

УДК 551.324

## ПРОЯВЛЕНИЕ ДЕГАЗАЦИИ В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ И РЕЛЬЕФЕ ЮЖНО-НОВОЗЕМЕЛЬСКОГО ЖЕЛОБА (ПЕЧОРСКОЕ МОРЕ)

© 2023 г. Е. А. Мороз<sup>1,\*</sup>, Е. А. Еременко<sup>1,2</sup>, А. П. Денисова<sup>1</sup>, А. Д. Мутовкин<sup>3</sup>, Р. А. Ананьев<sup>3</sup>

Представлено академиком РАН К.Е. Дегтяревым 27.04.2023 г.

Поступило 27.04.2023 г.

После доработки 02.05.2023 г.

Принято к публикации 04.05.2023 г.

Результаты детальных геолого-геоморфологических исследований в акватории Печорского моря с использованием комплекса гидроакустических методов в 52-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” позволили выявить многочисленные газовые воронки (покмарки) на дне Южно-Новоземельского желоба. Эти формы широко распространены на значительной части дна Баренцева моря, в то время как на Печорском шельфе сведения об их распространении крайне немногочисленны. Анализ сейсмоакустических разрезов на участках развития газовых воронок показал наличие вертикальных подводящих каналов в неконсолидированных осадках Южно-Новоземельского желоба, по которым происходит подъем газа к поверхности дна и его выброс в водную толщу с формированием отрицательных форм рельефа, что сопровождается взмучиванием донных осадков.

*Ключевые слова:* покмарки, дегазация, Печорское море, сейсмоакустика, многолучевое эхолотирование

**DOI:** 10.31857/S2686739723600820, **EDN:** HZIHSE

Выраженные в рельефе дна изометричные (реже – овалы) газовые воронки, называемые также покмарками, имеют широкое распространение на шельфах Арктических морей и хорошо идентифицируются по данным многолучевой батиметрии и гидролокации бокового обзора. Покмарки хорошо изучены в центральной и юго-западной части дна Баренцева моря, преимущественно, в норвежском секторе [1]. В то же время в юго-восточной части Баренцевоморского шельфа (Печорское море) газовые воронки имеют, по видимому, весьма ограниченное распространение. Глубины Печорского моря изменяются от 20 до 250 м. Наиболее глубокие участки приурочены к Южно-Новоземельскому желобу – крупной отрицательной морфоструктуре, представляющей собой зону интенсивной аккумуляции позднечетвертичных отложений [2]. На территориях гляциальных шельфов Западной Арктики газовые воронки, как правило, распространены на глубинах более 150–180 м, где ледниковый ре-

льеф и сопряженные с ним отложения развиты ограниченно, что благоприятствует выходу газа на поверхность. На меньших глубинах (в частности, на возвышенностях центральной части Баренцева моря и мелководном шельфе Печорского бассейна) газовые воронки существенно менее распространены.

Материалы батиметрической съемки были получены на гидроакустическом комплексе Reson Seabat 8111 с частотой сигнала 100 кГц. Разрезы высокочастотного акустического профилирования – на непараметрическом профилографе Edgetech 3300 с модулируемой частотой сигнала 2–12 кГц. Также в работе представлены временные разрезы спаркера с частотой сигнала 300–400 Гц. Используемый комплекс гидроакустического оборудования позволяет картировать газонасыщенные осадки и выходы газа в водную толщу [3] на шельфовых пространствах.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты многолучевого эхолотирования, выполненного в 52-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” [4], позволили обнаружить на дне Южно-Новоземельского желоба (рис. 1) на глубинах более 160 м хорошо выраженные газовые воронки (рис. 2 а). Основная масса покмарок сконцентрирована в пределах ложбинообразного понижения, ориентированного в ЮВ–СЗ-направлении

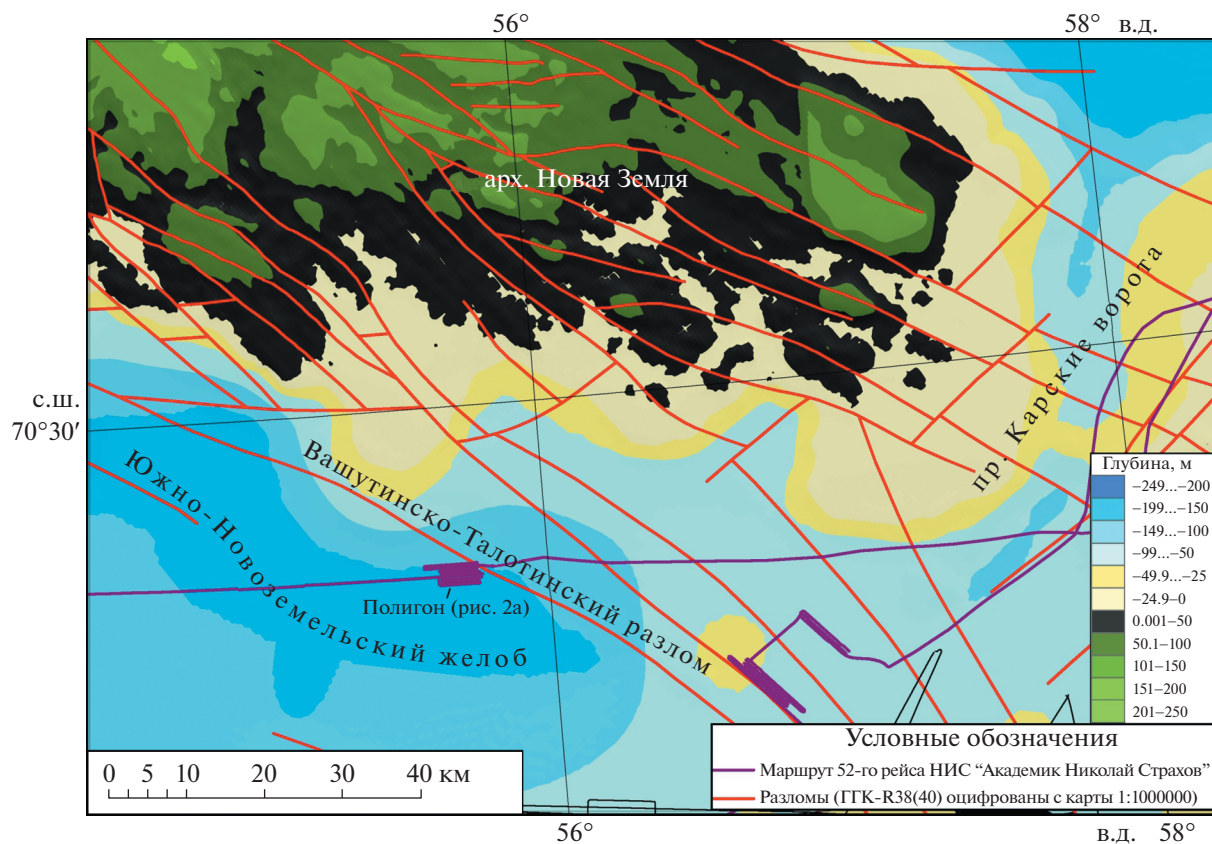
<sup>1</sup>Геологический институт

Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: morozze@gmail.com



**Рис. 1.** Район работ 52-го рейса НИС "Академик Николай Страхов" в Печорском море. Полигон с выявленными процессами дегазации примыкает к Вашуткино-Талотинской взбросо-надвиговой зоне. Топооснова IBCAO V3 [5].

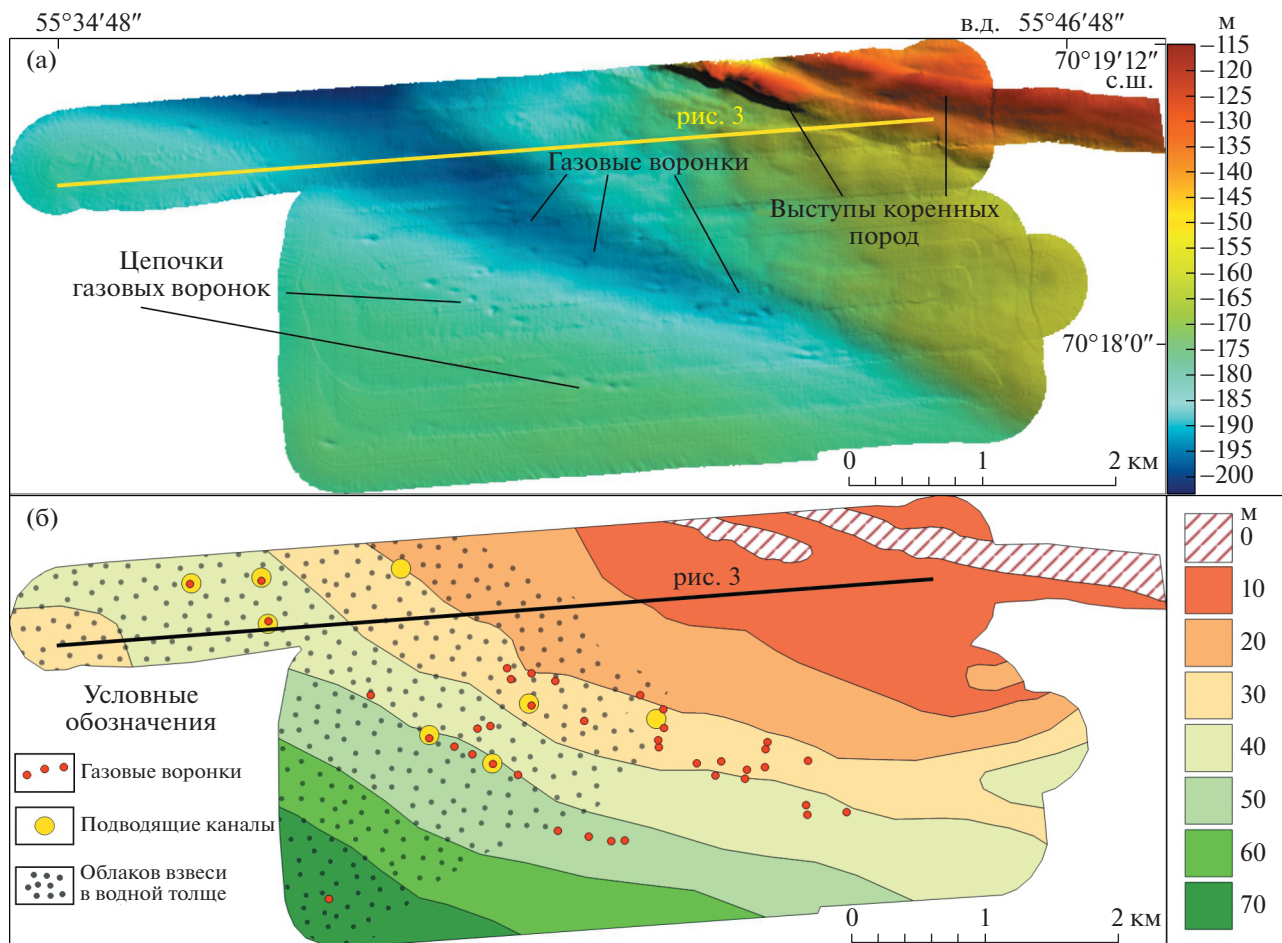
согласно простираению основных морфоструктур, контролируемых системой субпараллельных разломов Вашуткино-Талотинской надвиговой зоны [6], разделяющей моноклинально залегающие породы Печороморского бассейна и складчатый комплекс Новой Земли [7].

Газовые воронки имеют четкие плавные бровки и в их днище отсутствуют линзы заполнения, что, по-видимому, свидетельствуют об их сравнительной молодости и/или же об активности данных форм. По данным сейсмоакустического профилирования установлено, что формирование покмарок и накопление голоценовых морских осадков происходит одновременно, на что указывает сниженная мощность (а иногда и полное отсутствие) последних непосредственно в днище форм (рис. 3). Выявлено, что в районе распространения покмарок в настоящее время происходит выброс газа в водную толщу. В частности, акустическая картина водной толщи характеризуется наличием контрастного облака частиц с усиленным типом отражения (рис. 4), которое ассоциируется с присутствием большого количества взвеси в воде.

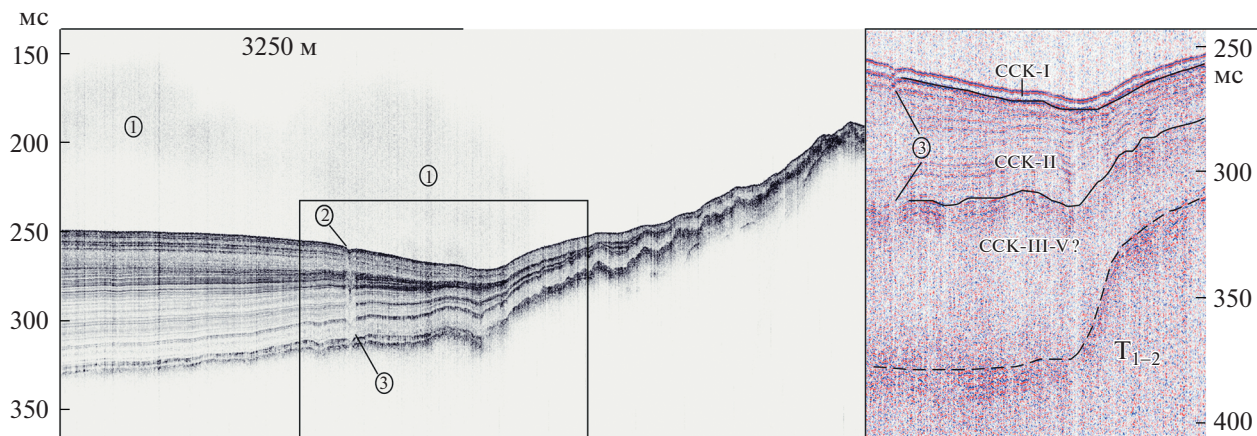
При анализе серии профилей, полученных в ходе рейса, было выполнено картирование аку-

стических аномалий в разрезе и водной толще, составлены карты их распределения и мощности рыхлых морских отложений на полигоне (рис. 2 б).

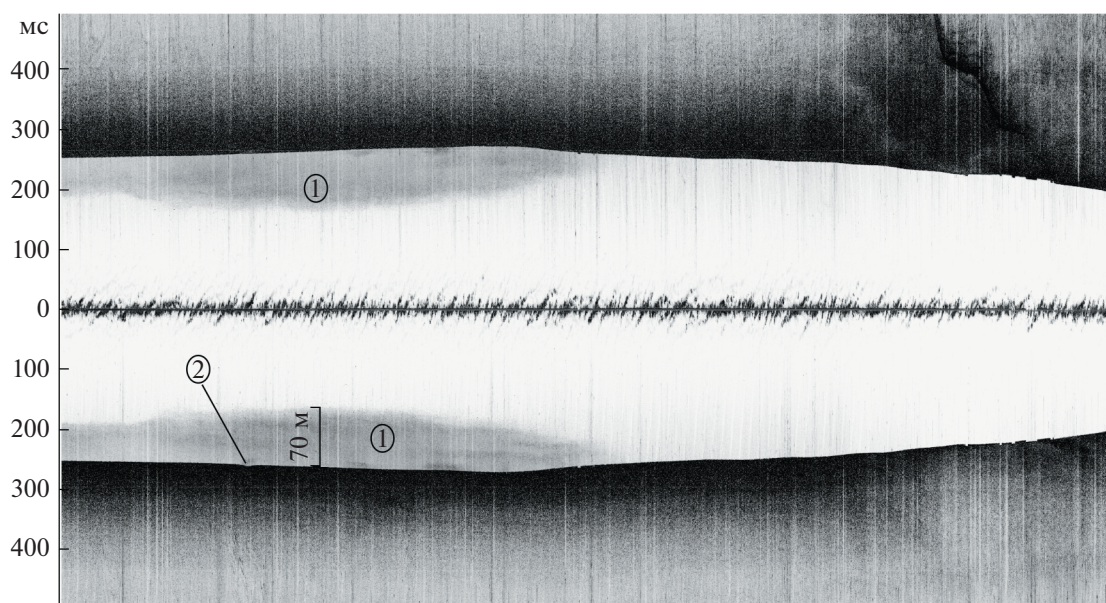
По сейсмоакустическим разрезам профилографа (2–12 кГц) и спаркера рыхлый осадочный чехол на полигоне исследований представлен сверху вниз разновозрастными четвертичными морскими и ледниково-морскими, а также ледниковыми отложениями, выполняющими неровности мезозойского палеорельефа. Верхнее региональное несогласие между четвертичными и дочетвертичными, по-видимому, триасовыми осадочными комплексами представлено четко выраженным рефлексом с повышенной отражающей способностью (рис. 3). Сейсмofации морских голоценовых и позднеплейстоценовых отложений (хроногенетическая интерпретация – по [8, 9]) ССК-I (сеймостратиграфический комплекс) представлены преимущественно параллельным и субпараллельным типом сейсмоакустической записи в пределах днища желоба и волнистым и бугристым типом на его северо-восточном борту. Данным типам осадков свойственны хорошая акустическая проницаемость и слоистость, характерная для алевроито-пелитовых отложений [8].



**Рис. 2.** а – Рельеф полигона по данным многолучевой батиметрии. На дне отчетливо выделяются газовые воронки (покмарки), приуроченные к пониженным абсолютным отметкам рельефа. В западной части полигона воронки объединены в цепочки. б – Карта мощностей четвертичных отложений, составленная по данным сейсмоакустического профилирования. Облако взвеси в воде наблюдается преимущественно в западной части полигона и выходит за пределы распространения покмарок.



**Рис. 3.** Профиль высокочастотного профилирования 2–12 кГц (положение на рис. 2) и НСП (справа). Слоистая толща неконсолидированных, хорошо стратифицированных морских осадков, залегающая с раздувом мощности, прерывается вертикальными зонами осветления, приуроченными к участкам выхода газа на поверхность. 1 – акустическая мутность в воде; 2 – газовая воронка; 3 – подводящий канал (“газовая труба”).



**Рис. 4.** Иллюстрация сонарной моды эхолота (положение на рис. 2). В воде отмечается контрастное облако акустической мутности, по-видимому, представлявшее собой взвешенный материал, поднимаемый водно-газовыми струями на высоту до 70 м. 1 – акустическая мутность в воде (взвесь алевроито-пелитового материала); 2 – газовая воронка на дне.

В днище желоба под толщей ССК-I залегает слоистая толща ССК-II, слагающая аккумулятивное тело типа “мелководного контуристового дрефта” [10], созданное, по-видимому, деятельностью придонных течений на стадии дегляциации в конце позднего плейстоцена. Мощность толщи ССК-II достигает 60–65 м и сокращается при приближении к тыловому шву днища желоба. Наименьшие мощности (не более 10–15 м) отмечаются на борту желоба, в пределах приподнятого блока мезозойских, по-видимому, триасовых пород [6].

В основании четвертичной части разреза выделяется волнисто-холмистый тип сейсмозаписи, маркирующий кровлю ССК-III [11], представленного базальными тиллами средней стадии валдайского оледенения. Это акустически прозрачные осадки мощностью до 50 м, в нижней части – с признаками субгоризонтальной слоистости. По сейсмоакустическим данным, собранным в ходе 52-го рейса НИС “Академик Николай Страхов”, между ССК-III и кровлей триасовых пород не выделяются дополнительные отражающие горизонты, что может быть связано с увеличением мощности ССК-III за счет ССК-V представленного донной мореной раннего валдая [11].

Именно в толщах ССК-I, ССК-II и в верхней части отложений ССК-III, перекрывающих консолидированные (коренные дочетвертичные) по-

роды, хорошо прослеживаются вертикальные подводящие каналы газовых воронок.

Таким образом, в целом мощность современных и позднеплейстоценовых отложений закономерно сокращается с юго-запада на северо-восток и контролируется тектоническим строением, а также особенностями современного осадконакопления в Южно-Новоземельском желобе. В пределах желоба мощность четвертичной части разреза увеличивается, тогда как на его борту и мелководных участках подводного обрамления Новой Земли она минимальна.

Покмарки (флюидогенный рельеф) являются наиболее распространенными формами, осложняющими фоновый рельеф морского дна, на изученном полигоне их выявлено 25 штук. Они имеют диаметр от 40 до 100 м и глубину от 1 до 4 м. Газовые воронки сконцентрированы в днище желоба в виде отдельных субмеридионально ориентированных (ЗСЗ-ВЮВ) кластеров. К наиболее глубокой части днища желоба приурочена большая часть покмарок, которые располагаются в виде цепочек. Суммарная мощность ССК-I и ССК-II, подстилаемых ледниковыми отложениями позднего плейстоцена, достигает здесь 25–35 м. Также в виде цепочек покмарки встречаются и на относительно повышенной части днища желоба (в юго-западной части полигона). Здесь они также сгруппированы в цепочки, общая ориентировка которых ЗСЗ-ВЮВ, параллельно цепочкам в

наиболее глубокой части желоба. Суммарная мощность ССК-I и ССК-II составляет здесь около 40–50 м. Отметим, что ориентация цепочек покмарок, как и самого тальвега желоба, на данном участке совпадает с простиранием тектонических разломов, отмеченных на геологической карте [7] (рис. 2 а), что свидетельствует о приуроченности участков активной дегазации к разломным нарушениям. Акустические аномалии, фиксирующие газонасыщенность приповерхностных рыхлых осадков, были выявлены и на других крупных разрывных нарушениях Печороморского региона [12], что позволяет говорить о ведущем вкладе тектоники в процесс вертикального транспорта флюидов.

Вертикальные подводящие каналы с V-образной морфологией рефлекторов и признаками потери акустической яркости хорошо прослеживаются под покмарками до глубины 60–65 м ниже поверхности дна в осадочном чехле. Участки вертикального осветления подводящих каналов прослеживаются также в кровле и подошве ледниково-морских отложений, что может указывать на поступление флюидов из дочетвертичных пород и, в том числе, свидетельствовать о глубинной природе дегазации. Ледниковые отложения в данном случае не являются бронирующим горизонтом, который препятствует выходу газа на поверхность, что может свидетельствовать о слабой их консолидации или же о неотектонической активности разломов ЗСЗ–ВЮВ-простирания, ориентированных субпараллельно региональным дизъюнктивам [6].

На активность некоторых газовых кратеров указывает выявленное по сонарным и сейсмоакустическим данным облако взвеси, создающее акустическую мутность (рис. 3, рис. 4), которая наблюдается от поверхности дна и поднимается вверх на 60–70 м. На разрезах профилографа облако взвеси формирует пики непосредственно над покмарками, а на сонарных изображениях отчетливо выделяется акустически яркое облако, фиксируемое непосредственно над поверхностью дна. Эти признаки свидетельствуют о поступлении газа к поверхности дна и в водную толщу, в ходе чего возникает вертикально направленный поток флюида, поднимающий тонкодисперсные частицы со дна.

Облако взвеси отмечается на достаточно значительной площади (рис. 2 б), однако лишь часть газовых воронок приурочены к данной территории. Несовпадение положения части кратеров с облаком мути может указывать на существование подводного течения, сносящего взвесь в З–СЗ-направлении от пролива Карские ворота во внутреннюю часть желоба [2]. При этом участки повышенной акустической мутности водной толщи выделяются в районе с хорошо выраженными

подводящими каналами под покмарками, что свидетельствует в пользу современной активности отдельных форм. По-видимому, наиболее интенсивное взмучивание осадочного материала под действием поднимающихся к поверхности дна флюидов происходит в центральной и западной частях полигона, где плотность покмарок максимальна.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные позволяют заключить, что начало формирования флюидогенных форм можно отнести к моменту снятия ледниковой нагрузки (перехода ледника в плавучее состояние), когда создались условия для беспрепятственного выхода газа на поверхность. Значительная тектоническая раздробленность Вашуткино-Талотинской зоны деформаций, а также, по-видимому, ее неотектоническая активность стали причиной того, что залегающие в подошве четвертичного разреза базальные тиллы не могли создать значительного барьерного эффекта для процессов дегазации. Синхронно с дегляциацией происходила стадийная аккумуляция осадочного материала в Южно-Новоземельском желобе при участии подводных течений и в результате таяния ледниковых масс. Накапливавшиеся толщи ледниково-морских осадков прорабатывались поднимающимися флюидами. Образование газовых кратеров происходило непрерывно и с постледниковым осадконакоплением, на что указывает непрерывность вертикальных подводящих каналов без признаков перерыва процесса выноса вещества. Также, по данным высокочастотного акустического профилирования, на исследуемой территории не выявлено погребенных покмарок, что может указывать на непрерывность процесса дегазации. В дальнейшем после полной деградации ледников около 13 тыс. л.н и затем в голоцене происходил следующий этап аккумуляции осадков на функционирующие выходы газа, что приводило к последующему развитию покмарок уже в более молодых отложениях вплоть до настоящего времени. На основе полученных нами материалов можно утверждать, что процесс дегазации покмарок является активным по состоянию на 2021 год.

## ВЫВОДЫ

Новые данные о рельефе дна и строении верхней части осадочного разреза Южно-Новоземельского желоба свидетельствуют о продолжающемся сфокусированном подъеме флюидов, приуроченном к зоне крупного регионального разлома (Вашуткино-Талотинского). На дне выявлен флюидогенный рельеф – газовые воронки, прорывающие голоценовые отложения, через ко-

торые на поверхность происходит подъем флюидов в водную толщу, что сопровождается подъемом взвеси со дна.

Пространственная локализация проявлений дегазации, в частности, линейность цепочек газовых воронок, совпадение их ориентировки с направлением основных разрывных нарушений и характер акустических аномалий указывают на тектоническую предопределенность в распространении флюидогенного рельефа на дне и газопоявлений в водной толще. Наиболее интенсивная дегазация отмечается в днище Южно-Новоземельского желоба, где мощность четвертичных осадков достигает 60–65 м.

Процесс дегазации оказывает влияние на современную морскую седиментацию. Так, подъем флюидов приводит к увеличению мутности воды. Под действием придонных течений взвесь выносятся на изученном участке в ЗСЗ-направлении, в результате чего скорости седиментации на участках дегазации ниже, чем на не затронутых этим процессом участках дна.

Активизация процесса дегазации, по-видимому, была синхронна с периодом снятия ледниковой нагрузки в конце позднего плейстоцена. В послеледниковое время в днище Южно-Новоземельского желоба происходило образование флюидогенного рельефа, которое, по имеющимся данным, продолжается и в настоящее время.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают благодарность экипажу 52-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” за содействие в осуществлении продуктивных и безопасных морских работ в арктических широтах.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-77-10091 “Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rise L., Bellec. V.K., Chand S., Reiduly B.* Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords. // *Norwegian Journal of Geology*, 2015. V. 94. P. 263–282. <https://doi.org/10.17850/njg94-4-02>
2. *Митяев М.В., Хасанкаев В.Б., Голубев В.А.* Желоба Баренцева моря – современные каналы транспортировки или ловушки осадочного вещества? // *Арктика и Антарктика*. 2007. Выпуск 5 (39). С. 72–79.
3. *Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Росляков А.Г., Черных Д.В., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А., Семилетов И.П.* Использование комплексных акустических методов для мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе Арктических морей // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 151–157. <https://doi.org/10.31857/S0030157422010014>
4. *Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Мороз Е.А., Кокин О.В.* Исследования в Баренцевом и Карском морях в 52-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 3. С. 499–501. <https://doi.org/10.31857/S0030157422030078>
5. *Jakobsson M., Mayer L., Coakley B., Dowdeswell J.A., Forbes S., Fridman B., et al.* The international bathymetric chart of the Arctic Ocean (IBCAO) version 3.0. // *Geophys Res Lett*. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012GL052219>
6. *Казанин Г.С., Павлов С.П., Шлыкова В.В., Ступакова А.В., Норина Д.А., Сауткин Р.С., Суслова А.А.* Сейсмо-геологическое строение Печорского и юго-восточной части Баренцева морей на основе интерпретации каркасной сети сейсмических профилей МОВ ОГТ 2Д // *Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии*. Выпуск 3. С. 59–81.
7. Государственная геологическая карта масштаба 1 : 1 000 000 лист R-38 (40), ВСЕГЕИ 2003.
8. *Костин Д.А., Тарасов Г.А.* Четвертичный осадочный чехол Баренцево-Карского бассейна // *Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии*. М.: ГЕОС. 2011. Вып. 3. С. 107–130.
9. *Эпштейн О.Г., Длугач А.Г., Старовойтов А.В.* Важнейшие особенности строения, литологического состава и мощности покрова четвертичных отложений в восточной части Баренцева моря // *ДАН*. 2019. Т. 485. № 3. С. 331–334. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524853331-334>
10. *Pepe F., Di Donato V., Insinga D., Molisso F., Faraci C., Sacchi M., Dera R., Ferranti L., Passaro S.* Seismic stratigraphy of upper Quaternary shallow-water contourite drifts in the Gulf of Taranto (Ionian Sea, southern Italy) // *Marine Geology*. 2018. V. 397. P. 79–92.
11. *Gataullin V., Mangerud J., Svendsen J.I.* The extent of the Late Weichselian ice sheet in the southeastern Barents Sea // *Global and Planetary Change* 31 (1): 453–474. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00135-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00135-7)
12. *Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Агранов Г.Д., Сухих Е.А., Ананьев Р.А., Разумовский А.А., Левченко О.В.* Проявления дегазации в верхней части осадочного разреза Печорского моря и ее связь с тектоникой // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021. Т. 499. № 2. С. 91–96. <https://doi.org/10.31857/S268673972108017X>

## THE MANIFESTATION OF DEGASSING IN THE SEDIMENTARY COVER AND RELIEF OF THE YUZHNO-NOVOZEMELSKY TRENCH (PECHORA SEA)

E. A. Moroz<sup>a,#</sup>, E. A. Eremenko<sup>a,b</sup>, A. P. Denisova<sup>a</sup>, A. D. Mutovkin<sup>c</sup>, and R. A. Ananiev<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Institute of Geography Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>c</sup>*Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: morozzea@gmail.com*

Presented by Academician of the RAS K.E. Degtyariov April 27, 2023

The results of detailed geological and geomorphological studies in the waters of the Pechora Sea using a complex of hydroacoustic methods in the 52 cruise of the R/V “Academic Nikolaj Strakhov” revealed numerous gas funnels (pockmarks) at the bottom of the Yuzhno-Novozemelsky trench. These forms are widespread on most of the bottom of the Barents Sea, while on the Pechora shelf there is very little information about their distribution. Analysis of seismoacoustic sections at the sites of development of gas funnels showed the presence of vertical chimneys in unconsolidated sediments of the Yuzhno-Novozemelsky trench, through which gas rises to the bottom surface and its release into the water column with the formation of negative landforms, which is accompanied by churning bottom sediments.

*Keywords:* pockmarks, degassing, Pechora Sea, seismoacoustics, multibeam